Journal of Geography and Regional Development Vol 21, No. 3 (2023) – Serial Number 44

https:// doi.org/10.22067/jgrd.2023.82588.1291

Estimation of Actual Evapotranspiration of Pasture Plants using SEBAL Algorithm (Research-Case Study: Ahar County)[1]

Jalal Golreyhan
PhD student of Climatology, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

Karim Aminina [2]
Assistant Professor of Climatology, Department of Geography, Faculty of Humanities, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran

Khalil Valizadeh Kamran
Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 8 June 2023 Revised: 9 August 2023 Accepted: 17 August 2023

Abstract

This study tried to calculate the actual evapotranspiration rate of thyme, mint, and alfalfa pastures using the SEBAL method in the Ahar region, which is located in the south of Arsbaran forests and has numerous pastures of different species. For this purpose, 6 Landsat-8 satellite images (between 2017 and 2020), belognig to early and late period of growth, were used. The results were compared with the findings obtained by Penman-Monteith method. The results showed that, based on the SEBAL method, the mint crop had the lowest rate of evapotranspiration in the initial period of crop growth on 2021/5/29, with a numerical value of 2.84 mm per day, and the alfalfa crop also in the initial crop growth period on 2019/6/11 had the highest rate of evapotranspiration with a numerical value of 3.49 mm per day. Moreover, in the final period of growth in the SEBAL method, the mint crop on 2018/8/28 had the lowest rate of evapotranspiration with a numerical value of 6.18 mm per day, and the thyme crop had the highest evapotranspiration rate in the final product growth period on 2022/7/19, with a numerical value of 7.41 mm per day. Finally, based on the comparisons made between the studied methods in the early and late periods of growth in terms of square-mean error, mean absolute deviation, and coefficient of determination, it can be concluded that the SEBAL method compared to the Penman-Monteith method has an acceptable error rate (RMSE of 0.717, MAD of 0.658, and the coefficient of determination of 0.84 mm per day).

Keywords: Evapotranspiration, SEBAL, Pasture, Water requirement, Ahar County.

---

1. This article is an extract of PhD dissertation entitled Transpiration and Determining the Water required for Pasture Plants of Ahar County Using SEBAL and Satellite Image Processing, defended at Islamic Azad University, Ahar Branch, Ahar, Iran.

2. Corresponding author. Email: karimamininia@gmail.com

https:// doi.org/10.22067/jgrd.2023.82588.1291
مقالهٔ پژوهشی-مطالعه موردی

مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال بیست و یکم، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۴۰۲، شمارهٔ پیاپی ٤٤

برآورد تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی با الگوریتم SEBAL (مطالعهٔ موردی: شهرستان اهر)[۱]

جلال گل ریحان (دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر،ایران)
jalalgolreyhan150@gmail.com
کریم امینی‌نیا (استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران، نویسنده مسئول)
karimaminini@gmail.com
خلیل ولیزاده کامران (استاد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران)
valizadeh@tabrizu.ac.ir

صص ۱۹۷ ـ ۱٦۹

چکیده

در این پژوهش سعی شد در منطقه اهر که جنوب جنگل‌های ارسباران قرار گرفته و دارای مراتع بی‌شماری از گونه‌های مختلف است، میزان تبخیر و تعرق واقعی مراتع آویشن، نعناع و یونجه با استفاده از روش SEBAL محاسبه شود. برای این کار از ٦ تصویر ماهواره لندست ۸ بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ که در دوره اولیه و پایـانی رشد قرار داشتند، استفاده شد و نتایج با روش پنمن مانتیث مقایسه شد. نتایج بیانگر

۱. این مقاله برگرفته از رساله دکتری نویسنده اول با عنوان«برآورد تبخیر و تعرق واقعی و تعیین نیاز آبی گیاهان مرتعی با الگوریتم SEBAL و پردازش تصاویر ماهواره ای در شهرستان اهر است که در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر انجام شد.

تاریخ دریافت: ۱٤۰۲/۰۳/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۲/۰۵/۱۸ تاریخ تصویب: ۱٤۰۲/۰۵/۲٦

آن بود که براساس روش سبال، محصول نعنا در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۱/۵/۲۹ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۲/۸٤ میلی‌متر در روز و محصول یونجه نیز در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۱۹/٦/۱۱ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۳/٤۹ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره پایانی رشد در روش سبال، محصول نعنا در تاریخ ۲۰۱۸/۸/۲۸ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ٦/۱۸ میلی‌متر در روز و محصول آویشن نیز در دوره پایانی رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۷/٤۱ میلی‌متر در روز داشته است. درنهایت براساس مقایسه‌های انجام‌گرفته، میان روش‌های موردمطالعه در دوره اولیه و پایانی رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا، میانگین انحراف مطلق و ضریب تعیین، می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانتیث دارای میزان خطا با RMSE برابر با ۰/۷۱۷، MAD برابر با ۰/٦٥۸ و ضریب تعیین ۰/۸٤ میلی‌متر در روز بوده که قابل‌قبول است.

کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق، SEBAL، مرتع، نیاز آبی، شهرستان اهر.

۱. مقدمه

شهرستان اهر به‌عنوان مرکز منطقه ارسباران (نام محلی قره داغ)، به دلیل پوشش گیاهی متنوع منطقه مناسبی برای مطالعه گیاهان مرتعی است؛ ازاین‌رو برآورد دقیق تبخیر و تعرق نقش مهمی در تعیین کمیت تعادل آب در حوزه آبخیز و برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع آب دارد. کمّی‌سازی دقیق تبخیر و تعرق در نیاز آبی کشاورزی برای بهینه‌سازی تولید محصول، برنامه‌ریزی برای تخصیص آب، مدیریت آبیاری، ارزیابی اثرات تغییر کاربری زمین بر عملکرد آب، توسعه بهترین شیوه‌های مدیریتی برای به حداقل رساندن تخریب آب‌های سطحی و زیرزمینی و ارزیابی اثرات استفاده از زمین و شیوه‌های مدیریت بر منابع آب و کیفیت محیط‌زیست، حیاتی است. به‌طورکلی، روش‌های برآورد تبخیر و تعرق را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم کرد: (۱) مشاهدات میدانی با تجهیزات ثابت؛ مانند لایسیمتر، برج‌های

جریان و سینتیلومترهای دهانه بزرگ(لاگ و همکاران[1]، ۲۰۰۳ ،لوئی و همکاران[2]، ۲۰۲۰، والیام کوننات[3]، ۲۰۱۸)؛ (۲) روش‌های محاسبه مبتنی بر آب و هوا (آلن و همکاران[4]، ۱۹۹۸؛ هـوو و همکاران[5]، ۲۰۰۹؛ کوئی و همکاران[6]، ۲۰۱۹)؛ (۳) مدل‌های تبخیر و تعرق مبتنی بر سنجش از دور (لایپلت و همکاران[7]، ۲۰۲۱). در بین روش‌های اشاره‌شده روش مشاهده میدانی می‌توانـد در صورتی که به‌صورت پیوسته مشاهده شود و تغییرات سری زمـانی ارائـه دهـد، دقیـق‌ترین میزان تبخیر و تعرق را ارائه دهد؛ بااین‌حال، این روش در مقیاس میدانی عمل کرده و قادر بـه ارائه اطلاعات دقیق منطقه‌ای نیست. روش مبتنی بر آب و هوا که توسـط مبنـای نظـری قـوی پشتیبانی می‌شود، می‌تواند تبخیر و تعرق در مقیاس بزرگ را زمانی که اطلاعات آب و هـوا و گیاه در دسترس باشد، تخمین بزنـد. متأسـفانه ایـن روش دارای محـدودیت‌هایی در تخمـین تبخیر و تعرق برای مناطقی است که داده‌های اولیه کافی یا سـایر معیارهـا ندارنـد و پیش‌بینـی مرحله محصول خاص یک کار چالش‌برانگیز در مقیاس بزرگ است (آلن و همکاران[8]، ۲۰۰۷، مک‌شانه و همکاران[9]، ۲۰۱۷)؛ بنابراین درنهایـت بـا توجـه بـه چالش‌هـای موجـود در زمینـه تخمین تبخیر و تعریق در مناطق بزرگ، بسیاری از صاحب‌نظران روش‌های سـنجش از دوری را پیشنهاد کردند که یکی از این روش‌ها مدل سـبال اسـت کـه بـه ورودی کمـی از داده‌هـای زمینی برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی در هر پیکسل نیـاز دارد و می‌توانـد تبخیـر و تعـرق واقعی را برای مناطق بزرگ تخمین بزند؛ بر همین اساس پژوهش‌های زیادی در این زمینـه در ایران و جهان انجام شده است که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود.

یانگ و همکاران[10] (۲۰۱۸) در شمال غرب چین به ارزیابی راندمان ذخیره آب با اسـتفاده از الگوریتم سبال پرداختند. آن‌ها این نتیجه رسـیدند کـه بهتـرین راه مـدیریت آب در منـاطق

1. Lage
2. Liu
3. Valayamkunnath
4. Allen
5. Hu
6. Qiu
7. Laipelt
8. Allen
9. McShane
10. Yang

خشک کشور چین افزایش بهره‌وری آب و همچنین کنترل و محدودسازی احیا بی‌رویه مـزارع کشاورزی است. سیلوا و همکاران[1] (۲۰۱۸) به برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش سـبال و تصاویر لندست ۸ پرداختند. آن‌ها در این پژوهش مقادیر برآوردی تبخیـر و تعـرق از روش سبال را با روش پنمن مانتیث فائو مقایسه کردند که میزان اختلاف آن‌ها کمتر از ۱ میلی‌متـر در روز بود. اسدی و همکاران (۲۰۲۰) به برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی گیاه نخود با استفاده از الگوریتم سبال کوهستانی پرداختند. براسـاس نتـایج، سـطوح آبـی بـا مقـدار ۹/٦۱ و ۹/۵۰ میلی‌متر در روز دارای بیشـترین و اراضـی شـهری و بـایر بـا مقـدار میـانگین ۲/۸٤۵ و ۲/۰۸ میلی‌متر در روز به‌ترتیب در روش‌های سبال و سبال کوهستانی دارای کمترین میـزان تبخیـر و تعرق واقعی ۲٤ ساعته هستند. میـزان نیـاز آبـی محصـول نخـود نیـز بـه‌ترتیب ۷/۱٤ و ٦/۷۰ میلی‌متر در روز برای روش‌های سبال و سبال کوهستانی برآورد شد و با روش پنمن مانتیث با مقدار ٦/۳۲ میلی‌متر در روز مقایسه شد که دارای میانگین تفاضل مطلق ۰/٦۰ اسـت. اسـدی و کامران (۲۰۲۲) برای ارزیابی تبخیر و تعـرق واقعـی گنـدم از روش‌هـای سـنجش از دوری و تصاویر لندست در پارس‌آباد مغان استفاده کردند. نتایج نشان داد که بیشـترین میـزان تبخیـر و تعرق واقعی محصول گندم در طول دوره توسعه مربوط به سال ۱۳۹۷ (۷/۸٦میلی‌متـر در روز) در روش آلارام و کمترین میزان در دوره اواسط رشد مربوط به سال ۱۳۹٦ (۰/۳۲ میلی‌متـر در روز) در روش متریک است. اسـدی و کـامران (۲۰۲۳) براسـاس الگـوریتم تعـادل انـرژی بـه برآورد نیاز آبی محصـولات انتخاب‌شـده در نیمـه شـمالی اسـتان اردبیـل پرداختنـد. در ایـن پژوهش، از تصـاویر لندسـت ۷ و ۸ و روش‌هـای سـبال و سـبس بـرای بـرآورد نیـازی آبـی محصولاتی مانند گندم، جو، یونجه، عدس و نخود استفاده شد. نتـایج نشـان داد کـه محصـول گندم در سال ۲۰۱۸ با مقدار عددی ۱/۵۲ میلی‌متر در روز در روش سبال و ۱/۰۹ میلی‌متـر در روش سبس کمترین میزان و محصول عـدس در سـال ۲۰۱۳ بـا مقـدار عـددی ۷/۸٦ و ۸/۱٤ میلی‌متر در روز بیشترین میزان تبخیر و تعرق را در بـین محصـولات بررسی‌شـده داشـتند. بـا توجه به سوابق پژوهش و پیامدهای مهمی که تغییرات تبخیر و تعرق کاربری‌ها و محصـولات در چرخه هیدرولوژی و در چرخه زندگی انسان دارد، هدف اصلی پـژوهش حاضـر، بـرآورد

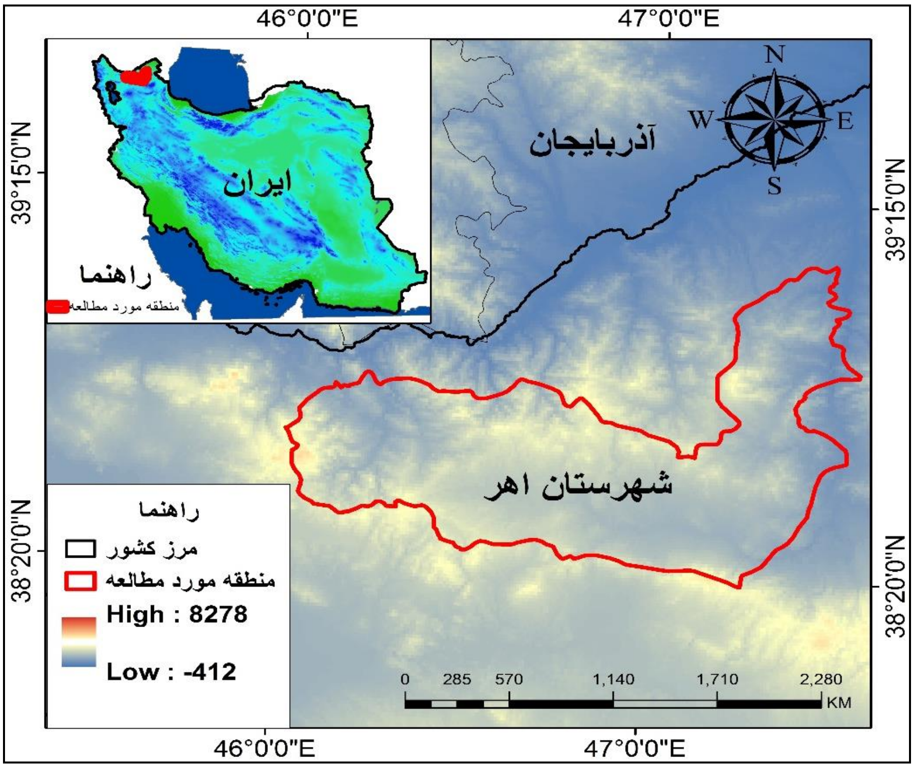
1. Silva

تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی در شهرستان اهر بـا الگـوریتم SEBAL اسـت کـه بـرای توسعه پایدار و حفاظت از مراتع منطقه مذکور اهمیت دارد و نیاز است که با آگـاهی از میـزان تبخیر و تعرق واقعی آن و مدیریت صحیح منابع آبی از نابودی گیاهان مرتعی منطقه جلوگیری شود.

۲. روش‌شناسی تحقیق

۲. ۱. منطقه موردمطالعه

شهرستان اهر با اقلیمی نیمه‌خشک و سرد و با مساحتی بالغ بـر ۳۰۷۳/۹۳ کیلومترمربـع در شمال استان آذربایجان شرقی و شمال غرب کشـور ایـران قـرار دارد. ایـن شهرسـتان از نظـر مختصات جغرافیایی بین عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۹ درجه ٦ دقیقـه شـمالی و طول جغرافیایی ٤٥ درجه ۵۹ دقیقه تا ٤٧ درجه و ٣٤ دقیقه طول شرقی قـرار گرفتـه اسـت. شهرستان اهر از سمت جنوب به شهرستان هریس، از شمال به شهرستان کلیبر، از سمت غرب به شهرستان ورزقان و از سمت شرق به استان اردبیل محدود می‌شود.



شکل ۱. منطقه موردمطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۲

۲. ۲. تصاویر ماهواره‌ای

در این پژوهش برای تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی مانند آویشن، نعناع و یونجه (دلیل استفاده از گیاهان مطروحه سطح زیر کشت بالا و کسرت استفاده آن در منطقه است) از تصاویر لندست ۸ OLI در ردیف ۰۳۳ و قطعه ١٦٨ با زمان گذر ۰۷:۳۲ دقیقه که در بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ قرار داشت و بدون ابر بودند (برای منطقه موردمطالعه) استفاده شد. مشخصات تصاویر استفاده‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین از داده‌های هواشناسی دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای نقطه شبنم، سرعت باد و ساعات آفتابی نیز که برگرفته از ایستگاه اهر بود، استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۲ برای سال‌های موردبررسی ارائه شده است.

جدول ۱. تصاویر لندست ۸ مورداستفاده

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۲

سنجنده	ماه و روز	سال	ردیف
لندست ۸	۲۲ اگوست	۲۰۱۷	۱
لندست ۸	۲۸ اگوست	۲۰۱۸	۲
لندست ۸	۱۱ ژوئن	۲۰۱۹	۳
لندست ۸	۲ ژوئن	۲۰۲۰	٤
لندست ۸	۲۹ می	۲۰۲۱	٥
لندست ۸	۱۸ جولای	۲۰۲۲	٦

جدول ۲. مشخصات هوای ایستگاه اهر

مأخذ: یافته‌های پژوهش،۱٤۰۲

ردیف	سال	ماه و روز	دمای حداقل	دمای حداکثر	دمای نقطه شبنم	سرعت باد	ساعات آفتابی
۱	۲۰۱۷	۲۲ اگوست	۱۱/٦	۲٤/۷	۱۲/۱	۷/۹	۲٦۸/۳
۲	۲۰۱۸	۲۸ اگوست	۱۱/۳	۲٥/۱	۱۲/۳	۸/۱	۲٥٥/۹
۳	۲۰۱۹	۱۱ ژوئن	۹/۲	۲۳/۲	۱۰/٤	۷/۲	۲۹۲/۷
٥	۲۰۲۰	۲ ژوئن	۹	۲٤	۱۰/۲	۷/٦	۲۹۹/٤
٦	۲۰۲۱	۲۹ می	٦	۱۹/۷	٦/۸	٦/۹	۲٤۳/٦
۷	۲۰۲۲	۱۸ جولای	۱۰/۷	۲٥	۱۲/۸	۸	۲۸٥/٦

۲. ۳. الگوریتم تعادل انرژی[1]

الگوریتم‌های تعادل انرژی مانند SEBAL روش‌هایی هستند که براساس روابط فیزیکی و تجربی، مقدار تبخیر و تعرق لحظه‌ای و روزانه محصول را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و میزان کم داده‌های مشاهداتی زمینی برآورد می‌کنند (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸؛ سو، ۲۰۰۲، اووانه و سلیمان[2]، ۲۰۱۸). برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از روش SEBAL ابتدا روابط ریاضی موردنیاز برای انجام تجزیه و تحلیل‌هایی مانند بازتبندگی[3]، شاخص‌های پوشش

1. Surface Energy Balance Algorithm
2. Owaneh and Suleiman
3. Reflectance

گیاهی[۱]، گسیلمندی[۲]، آلبیدوی سطحی[۳]، دمای سطحی[۴]، شار تابش[۵]، شار گرمای خاک[۶]، شار گرمای محسوس[۷]، شار گرمای نهان[۸] و غیره شناسایی شد و درنهایت به محاسبه شار لحظه‌ای[۹] و مقدار روزانه تبخیر و تعرق[۱۰] مبادرت شد که در ادامه به بررسی و تشریح آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲. ٤. روش‌شناسی الگوریتم سبال

۲. ٤. ۱. تصحیحات اتمسفری

انجام تصحیحات اتمسفری در سنجش از دور بسته به اهداف پژوهش برای انجام تجزیه‌وتحلیل‌ها بسیار مهم و ضروری است. درکل می‌توان بیان کرد که برای اهدافی چون شناسایی کاربری‌های زمین که تصاویر دارای پیکسل‌های مشابه هستند، به استفاده از تصحیحات اتمسفری نیاز نیست (مادر و تسو[۱۱]، ۲۰۱٦، ۱۱).

در روش سبال برای برآورد میزان بازتابندگی زمین از تصاویر ماهواره‌ای ابتدا از تبدیل مقادیر پیکسل[۱۲] به رادیانس طیفی (رابطه ۱) استفاده می‌کنند (آلن و همکاران، ۲۰۰۲؛ اسدی و همکاران، ۱۳۹۹):

$$L_\lambda = (M_L . Q_{cal}) + A_l$$ رابطه (۱)

1. Vegetation index
2. Emissivity
3. Surface albedo
4. Surface temperature
5. Net radiations
6. Soil heat flux
7. Sensible heat flux
8. Latent heat flux
9. Instantaneous flux
10. Daily evapotranspiration
11. Mather & Tso
12. Pixel value

که در آن، L_λ: رادیانس طیفی برای هر باند برحسب $\left({}^{W}/_{m^2}.S.\mu m\right)$، M_L: فاکتور ضریب اصلاحی چندگانه باند مخصوص، Q_{cal}: مقادیر پیکسل استاندارد تولیدشده، A_l: فاکتور ضریب اصلاحی افزایشی باند مخصوص است. در ادامه برای محاسبه بازتابندگی سیاره‌ای[1] براساس تابش طیفی از رابطه ۲ استفاده می‌شود (کوسا[2]، ۲۰۱۱، ص. ۲۱٤):

رابطه (۲)

$$P\lambda = \frac{\pi.L\lambda}{ESUN\lambda.COS\theta.dr}$$

که در آن، $P\lambda$: بازتابندگی سیاره‌ای، π: برابر است با عدد ۳/۱٤، $ESUN\lambda$: میانگین تابش طیفی خورشید برای باندهای مختلف، $COS\theta$: زاویه ارتفاع خورشیدی و dr: معکوس مجذور فاصله تقریبی خورشید تا زمین است که مقدار آن از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$dr = 1 + 0.033.cos\left[Julian\ day\frac{2\pi}{365}\right]$$ رابطه (۳)

۲. ٤. ۲. محاسبه مقادیر مربوط به آلبیدوی سطحی

اگر نقش تبخیر و تعرق در کاهش دمای سطحی نادیده گرفته شود، در آن صورت دمای سطحی تنها با افزایش آلبیدو کاهش خواهد یافت (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸)؛ بنابراین دمای سطحی یکی از پارامترهای مهم در برآورد میزان تبخیر و تعرق است که با استفاده از رابطه ٤ محاسبه می‌شود (اسدی و همکاران، ۱۳۹۹):

$$r_0 = {}^{r_p - r_a}/_{\tau_{sw^2}}$$ رابطه (٤)

1. Planetary reflectance
2. Kosa

که در آن، r_0: آلبیـدوی سـطحی، r_a: میـانگین خطـای محاسـباتی حاصـل از بازتابنـدگی سـیاره‌ای اسـت کـه در ابتـدا مقـدار آن بـین ۰/۰۲۵ تـا ۰/۰٤ درصـد در نظـر گرفتـه می‌شـد (باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸) r_p: مقـدار آلبیـدوی حاصـل از ضـرایب وزنـی و بازتابنـدگی سیاره‌ای در بالای اتمسفر و τ_{sw}: ضـریب شـفافیت جـوی اسـت (مراجعـه شـود بـه آلـن و همکاران، ۲۰۰۲).

۲. ٤. ۳. محاسبات مربوط به گسیلمندی و دمای سطح زمین

دمای سطح زمین یک پارامتر بسیار مهم در بسـیاری از ویژگـی‌هـای سیسـتم زمـین ماننـد تقسیم بودجه انرژی سطحی، پایداری استاتیکی، شدت آشـفتگی در لایـه مـرزی اتمسـفری و تبخیر و تعرق و غیره است (امیدوار و همکـاران، ۲۰۱۸؛ دی ارلانـو و همکـاران[۱]، ۲۰۱۵). در روش سبال برای محاسـبه میـزان دمـای سـطح زمـین از رابطـه ۵ اسـتفاده می‌شـود (جنـانو و همکاران[۲]، ۲۰۱۷):

$$T_s = \frac{K_2}{ln\left(\frac{\varepsilon_{NB}K_1}{R_C}+1\right)}$$ رابطه (۵)

که در آن، K_2 and K_1: ضرایب ثابت برحسب $\left(W/_{m^2}.S.\mu m\right)$ برای تصـاویر لندسـت است، ε_{NB}: گسیلمندی در باند حرارتی نسـبتاً باریـک و R_C: تـابش گرمـایی تصحیح‌شـده از سطح برحسب $\left(W/_{m^2}.S.\mu m\right)$ است.

در مدل سبال برای محاسبه گسیلمندی (گسیلمندی از باند حرارتـی بـا پهنـای باریـک یـا ε_{NB}، و گسیلمندی از باند حرارتی پهن ε) نیاز است که میزان شاخص‌های پوشـش گیـاهی و شاخص سطح برگ[۳] منطقه از طریق روابط ٦، ۷ و ۸ سـنجیده شـود (دو و همکـاران[٤]، ۲۰۱۳؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۷؛ ولیزاده کامران و اسدی، ۱٤۰۲):

1. De Arellano
2. Genanu
3. Leaf Index
4. Du

رابطه (٦)
$$NDVI = \frac{Near-Infrared\,Band - Red\,Band}{Near-Infrared\,Band + Red\,Band}$$

رابطه (٧)
$$SAVI = \frac{(Near-Infrared\,Band - Red\,Band).(1+L)}{Near-Infrared\,Band + Red\,Band}$$

رابطه (٨)
$$LAI = -\left(In\left(\frac{0.69-SAVI}{0.59}\right) \Big/ 0.91 \right)$$

که در آن‌ها، $Near-Infrared\ Band$: باند مادون قرمز، $Red\ Band$: باند قرمـز و L: فاکتور تصحیح‌کننده اثرات خاک است.

۲. ٤. ٤. محاسبات مربوط به تابش خورشید

سبال یک روش سنجش از دوری اسـت کـه در سـال‌های اخیـر بـه‌طور فزاینـده‌ای بـرای محاسبه میزان تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. روش مـذکور بـه‌طور درخورتـوجهی بـه تـوازن انرژی ترمودینامیکی بین فرایندهای رخ‌داده در سطح زمین و جو وابسته است که به آن تـوازن انرژی سطحی گفته می‌شود. درنهایت، سبال با برقراری توازن انرژی بین پدیده‌های سـطحی و جوی شار گرمای نهان را برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه به دست می‌آورد کـه از طریق رابطه ۹ بیان می‌شود (مخوانازی و همکاران[1]، ۲۰۱۵):

رابطه (۹)
$$LE = Q^* - G - H$$

که در آن، LE: شار گرمای نهان برحسب $\left(W/m^2\right)$، Q^*: شار تابش برحسب $\left(W/m^2\right)$، G: شار گرمای خاک برحسب $\left(W/m^2\right)$ و H: شـار گرمـای محسـوس برحسـب $\left(W/m^2\right)$ است.

منظور از شار تابش خالص همان مقدار تابش موجود در سطح است کـه از طریـق تفاضـل حاصله از میزان تابش‌های ورودی و خروجی از رابطه ۱۰ بیان می‌شود:

1 . Mkhwanazi

رابطه (۱۰)

$$Q^* = (1 - r_0).K\downarrow - L\downarrow - L\uparrow - (1 - \varepsilon_0).L\downarrow$$

که در آن، $K\downarrow$: تابش ورودی موج کوتاه خورشید برحسب $\left({W}/{m^2}\right)$ $L\downarrow$: تـابش طـول موج بلند ورودی به سطح برحسب $\left({W}/{m^2}\right)$ و $L\uparrow$: تابش طول موج بلند خروجی از سـطح برحسب $\left({W}/{m^2}\right)$ است (مراجعه شود به آلن و همکاران، ۲۰۰۲).

۲. ٤. ۵. محاسبات مربوط به شار گرمای خاک

شار گرمای خاک عمدتاً به‌وسیله گرادیان حرارتی بسیار پویـا در زمـان و مکـان در خـاک سطحی هدایت می‌شود (سینگ و همکاران[1]، ۲۰۰۸) که شـکل ریاضـی آن در رابطـه ۱۱ بیـان شده است:

رابطه (۱۱)

$$\frac{G}{Q^*} = {T_s - 237.15}/{r_0}.\{0.0038.r_0 + 0.007 * {r_0}^2\}.\{1 - 0.98.(NDVI^4)\}$$

که در آن، $\frac{G}{Q^*}$: کسر شار تابش خالص و شار گرمای خاک، T_s: دمـای هـوای سـطح زمـین برحسب کلوین و r_0: آلبیدوی سطحی است.

۲. ٤. ٦. محاسبات مربوط به شار گرمای محسوس

شار حرارت محسوس عبارت است از میزان هدر رفت گرما به‌وسیله هدایت یا انتقال گرما به هوا یا محیط پیرامون به علت گرادیان دمایی (اوبرگ و ملسس[2]، ۲۰۰٦). محاسـبات مربـوط به شار گرمای محسوس به دلیل دو مجهوله بودن (اختلاف دما[3]، مقاومت آیرودینامیـک بـرای انتقال گرما[4]) مشکل‌ترین بخش الگوریتم سبال است و از رابطه ۱۲ بـرآورد می‌شـود (کاسـتا و همکاران[5]، ۲۰۱۹، ص. ۹۵):

---

1. Singh
2. Oberg & Melesss
3. Temperature difference
4. Aerodynamic resistance to heat transport
5. Costa

رابطه (۱۲)
$$H = \rho . C_p . \left(\frac{a+(b*Ts)}{rah}\right)$$

که در آن، H: شار گرمای محسوس، ρ: تراکم هوا برحسب (kg/m^3)، C_p: گرمای ویـژه هوا در فشار ثابت که برابر اسـت بـا ۱۰۰٤ $J/kg/K$، $a + b$: ضـرایب تجربـی تعیین‌شـده از طریق یک کالیبراسیون داخلـی بـرای هـر تصـویر مـاهواره‌ای. ایـن بخـش از طریـق انتخـاب پیکسل‌های گرم (پیکسل خشک) و سرد (پیکسل مرطوب) تعیـین می‌شـود و بسـیار حسـاس است؛ چراکه به‌طور مستقیم بر نتایج محاسـبات مربـوط بـه بخـش شـار گرمـای محسـوس و همچنین میزان تبخیر و تعـرق تـأثیر اسـت و rah: مقاومـت آیرودینـامیکی بـه انتقـال گرمـا برحسب (s/m^{-1}) است. براساس روش سبال، محاسبات مربوط بـه مقاومـت آیرودینـامیکی انتقال دما ابتدا باید با شرایط آتمسفری خنثی صورت پذیرند تا بدین صورت مقدار اولیه شـار گرمای محسوس محاسبه شود. سپس با استفاده از محاسبه طـول پایـداری مـونین- ابوخـوف[1] (L) و انجام تکرار در روند محاسبات مقـادیر شـار گرمـای اصـلاحی بـرای همـه پیکسـل‌هـا محاسبه شوند. در آن صورت برای محاسبه سرعت اصطکاکی باد (u^*) خواهیم داشت:

رابطه (۱۳)
$$u^* = {u_{200} \times 0.41} \Big/ {In\left(\frac{200}{z_{om}}\right) - \Psi_{m(200m)}}$$

و درنهایت برای محاسبه مقاومت آیرودینامیکی به انتقال گرما خواهیم داشت:

رابطه (۱٤)
$$r_{ah} = {In\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}} \Big/ {u^* \times 0.41}$$

که در آن، $\Psi_{m(200m)}$: پایـداری اصلاح‌شـده بـرای انتقـال حرکـت در ۲۰۰ متـر، $\Psi_{h(z_1)}$: پایداری اصلاح شده برای انتقال گرما در ارتفاع یک متر و $\Psi_{h(z_2)}$: پایداری اصلاح‌شده بـرای

1. Monin-Obukhov length

انتقال گرما در ارتفاع دو متر است (برای کسب اطلاعات بیشتر به آلن و همکاران، ۲۰۰۲ مراجعه شود).

۲. ٤. ۷. محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق لحظه‌ای

تبخیر و تعرق لحظه‌ای عبارت است از مقادیر لحظه‌ای تبخیر و تعرق در برابر عمق تبخیر و تعرق که از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود (جنانو و همکاران، ۲۰۱۷):

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{\lambda ET}{\lambda}$$ رابطه (۱۵)

که در آن، ET_{inst}: تبخیر و تعرق لحظه‌ای برحسب (mm/hr) است و 3600: برای تبدیل ثانیه به ساعت استفاده می‌شود.

۲. ٤. ۸. محاسبات مربوط به کسر تبخیر و تعرق مرجع

کسر تبخیر و تعرق مرجع طبق تعریف عبارت است از حاصل تقسیم میزان تبخیر و تعرق لحظه‌ای بر تبخیر و تعرق مرجع که از رابطه ١٦ محاسبه می‌شود (محمود و آلزابا، ۲۰۱٦):

$$ET_rF = {ET_{inst}}/{ET_r}$$ رابطه (١٦)

که در آن، ET_rF: کسر تبخیر و تعرق مرجع، میزان کسر مذکور معمولاً بین صفر تا ۱ است، اما در زمین‌هایی همراه با کشت یونجه تا ۱/۱ نیز افزایش می‌یابد و ET_r: تبخیر و تعرق مرجع به‌دست‌آمده از نرم‌افزار REF-ET در زمان عبور ماهواره از روی منطقه موردمطالعه برحسب (mm/hr) است.

۲. ٤. ۹. محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق ۲٤ ساعته یا روزانه

به دست آوردن میزان تبخیر و تعرق روزانه معمولاً مفیدتر از در اختیار داشتن تبخیر و تعرق لحظه‌ای خواهد بود؛ چراکه بیشتر برنامه‌ریزی‌ها روی آن انجام می‌پذیرد؛ بنابراین برای محاسبه تبخیر و تعرق روزانه از حاصل ضرب کسر تبخیر و تعرق مرجع با مجموع ۲٤ ساعته تبخیر و تعرق مرجع براساس رابطه ۱۷ استفاده می‌شود (آل‌زیاد و همکاران، ۲۰۱٦):

$$ET_{24} = ET_rF \times ET_{r-24}$$ (رابطه ۱۷)

که در آن، ET_{r-24}: مجموع ۲٤ ساعته تبخیر و تعرق مرجع برحسب $\left({}^{mm}/_{day}\right)$ و ET_{24}: میزان تبخیر و تعرق روزانه برحسب $\left({}^{mm}/_{day}\right)$ است.

۲. ٤. ۱۰. مدل پنمن مانتیث

یکی از روش‌هایی که توسط سازمان فائو به‌عنوان روشی استاندارد برای برآورد میزان تبخیر و تعرق مرجع و مقایسه مقادیر آن با سایر روش‌ها توصیه شده است، روش پنمن مانتیث فائو است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) که پنمن در سال ۱۹٤۸ ارائه کرد. سپس در سال ۱۹٦٥ مانتیث در آن تغییراتی ایجاد کرد که بعدها به‌عنوان رابطه پنمن مانتیث مطرح شد (زوتارلی و همکاران[1]، ۲۰۱۰، ۲)؛ بنابراین در این پژوهش به‌عنوان مبنای ارزیابی و مقایسه استفاده شد. معادله مذکور به‌صورت رابطه (۱۸) است:

$$ET_O = \frac{0.408\times\Delta\times(R_n-G)+\gamma\times\frac{900}{T_a+273}U_2\times(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)}$$ (رابطه ۱۸)

که در آن، ET_O: تبخیر و تعرق گیاه مرجع برحسب (mm/d^{-1})، Ta: دمای هوا برحسب $(°c)$، U_2: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری $\left({}^{m}/_{s^{-1}}\right)$، R_n: تابش خالص در سطح زمین برحسب $(MJ/m^{-2}/d^{-1})$، G: شار گرمای خاک برحسب $(MJ/m^{-2}/d^{-1})$، e_s: فشار بخار

1. Zotarelli

آب اشباع، e^a: فشار بخار واقعی، $e_s - e_a$: کمبود فشار بخـار اشـباع هـوا (Kpa)، Δ: شـیب منحنی فشار بخار اشباع با دما $(KpaC^{-1})$ و γ: ثابت سایکرومتر $(KpaC^{-1})$ است (کرمـی و اسدی، ۲۰۱٦؛ اسدی و کرمی، ۲۰۲۰).

۲. ٤. ۱۱. ارزیابی مدل SEBAL

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی روش SEBAL در مقابل روش پنمن مانتیث فائو در برآورد نیاز آبی گیاهان مرتعی در شهرستان اهر از معیارهـای ضـریب تعیـین (R^2) و مجـذور میانگین مربعات خطا[1] (RMSE) استفاده شد. رابطه‌های مربوط به این آماره‌ها به‌صـورت زیـر است (زهو[2] و همکاران، ۲۰۱٤):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_{si}-E_{oi})^2}{n}} \times 100 \qquad \text{(19)}$$

رابطه (۱۹)

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i-1}^{n}(E_{si}-\bar{E})\right)(E_{oi}-\bar{E}_{oi})}{\left(\sum_{i-1}^{n}(E_{si}-\bar{E})\right)^2(E_{oi}-\bar{E}_{oi})^2}$$

رابطه (۲۰)

که در آن‌ها، مقادیر E_{si}، E_{oi} و $\bar{E}$ به‌ترتیب مربوط به تبخیر و تعرق برآوردی توسط روش پنمن مانتیث فائو و روش SEBAL و میانگین مقادیر است.

۳. یافته‌های تحقیق

۳. ۱. پراکنش تبخیر و تعرق در منطقه موردمطالعه

طبق تعریف روش سبال با برقراری توازن انرژی بین پدیـده‌هـای سـطحی و جـوی، شـار گرمای نهان را برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق واقعی روزانه به دست می‌آورند (مخوانازی و همکاران[3]، ۲۰۱۵، ص. ۱۵۰٤۸) که مقادیر برخی پارامترهای آن‌ها ماننـد شـار تـابش خـالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس در جدول ۲ برای روش سبال ارائه شده است.

1. Root Mean Square Error
2. Zhou
3. Mkhwanazi

جدول ۲ نشان‌دهنده مقادیر شار تابش خالص، شار گرمای خاک و شار گرمای محسوس در پیکسل‌های گرم و سرد در تاریخ‌های بررسی‌شده در منطقه موردمطالعه است؛ بر این اساس، مناطقی که دارای پوشش گیاهی و جنگلی هستند، به دلیل وجود رطوبت و ظرفیت گرمایی زیاد و به نوبه آن ذخیره گرمایی بیشتر، دارای مقادیر بیشتری از تابش خالص در مقایسه با مناطق خشک و بایر هستند. با توجه به جدول مذکور، مقادیر حداقل و حداکثر انتخابی شار تابش خالص در پیکسل سرد به‌ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۲۰۱/٦٤، ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ٤٦۲/۱۱ وات بر مترمربع و مقادیر انتخابی پیکسل گرم به‌ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۳۸۸/٦۳ و ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۵۹۰/٤۵ وات بر مترمربع است. همان‌گونه که گفته شد، دلیل زیادبودن میزان شار تابش خالص در پیکسل سرد در مقایسه با پیکسل گرم، زیابودن میزان رطوبت است. همچنین براساس جدول ۲، مقادیر حداقل و حداکثر انتخابی شار گرمای خاک در پیکسل سرد به‌ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۳۷/٦۵، ۲۰۱۷/۸/۲۲ با مقدار عددی ۵۹/٤٤ و مقادیر انتخابی پیکسل گرم به‌ترتیب مربوط به تاریخ‌های ۲۰۲۱/۵/۲۹ با مقدار عددی ۸۰/۳۹ و ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۱۱۱/۲۳ است. پایین بودن میزان شار گرمای خاک در پیکسل‌های سرد در مقایسه با پیکسل گرم به دلیل وجود پوشش گیاهی و رطوبت در پیکسل سرد است که باعث می‌شود اختلاف دما در سطح خاک با مقطع پایینی آن کمتر باشد؛ درنتیجه شار گرمای خاک در پیکسل سرد تغییرات کمتری را در مقایسه با پیکسل گرم داشته باشد. درمجموع، مقادیر شار گرمای خاک در هنگام گرمایش خاک مثبت و درهنگام سرد شدن خاک منفی است؛ بنابراین هنگام برآورد میزان تبخیر و تعرق مقادیر حاصل از آن یا به شار تابش خالص افزوده شده یا از آن کم می‌شود.

جدول ۳. مقادیر تابش خالص در پیکسل‌های سرد و گرم برای تصاویر بررسی‌شده در منطقه موردمطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۲

	شار تابش خالص		شار گرمای خاک		شار گرمای محسوس	
تاریخ تصویر بررسی‌شده	**پیکسل سرد**	**پیکسل گرم**	**پیکسل سرد**	**پیکسل گرم**	**پیکسل سرد**	**پیکسل گرم**
۲۰۱۷/۸/۲۲	۳٦٤/۷۲	٤۷۰/۱۳	٥۹/٤٤	۹۹/٤۷	۰/۱٥	۲/٥۱
۲۰۱۸/۸/۲۸	۳٤٥/۲۰	٤۹٦/۹٦	٤۸/۱۱	۹۸/۱۸	۰/۰۱	۳/۷٤
۲۰۱۹/٦/۱۱	۲۹۷/٥۲	٤۷۰/۲٥	٤٤/٥۷	۱۰٥/۷٦	۱/۰۷	۲/۸۰
۲۰۲۰/٦/۲	۲۰٥/۷۰	۳۹۸/۰۲	٤۳/۱۱	۱۰۲/٤۸	۰/۱۲	۳/٤۰
۲۰۲۱/٥/۲۹	۲۰۱/٦٤	۳۸۸/٦۳	۳۷/٦٥	۸۰/۳۹	۰/۰۹	۲/٦۳
۲۰۲۲/۷/۱۹	٤٦۲/۱۱	٥۹۰/٤٥	٥٤/۳۲	۱۱۱/۲۳	۱/۱٤	٤/۱۲

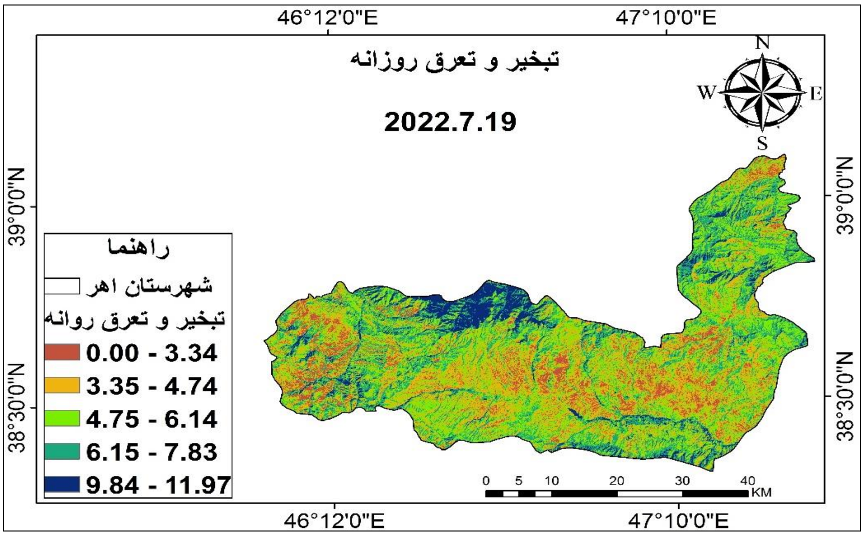
۳. ۲. تبخیر تعرق ۲٤ ساعته یا روزانه

در روش سبال بعد از انجام محاسبات مربوط به شار تابش خالص، شار گرمای خاک، شار گرمای محسوس و گرمان نهان تبخیر (λ) می‌توان به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۷ میزان شار گرمای نهان و تبخیر و تعرق لحظه‌ای را به دست آورد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Ref_ET میزان کسر تبخیر و تعرق مرجع برای زمان عبور ماهواره و کل روز یا همان ۲٤ ساعت محاسبه شد و در روابط ١٦ و ١٧ قرار داده شد و میزان تبخیر و تعرق ۲٤ ساعته یا روزانه به دست آورده شد. جدول ٤ نشان‌دهنده مقادیر حداقل و حداکثر تبخیر و تعرق روزانه در تاریخ‌های بررسی‌شده در منطقه موردمطالعه است. براساس جدول ٤، در روش سبال بیشترین میزان تبخیر و تعرق مربوط به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۱۱/۹۷ میلی‌متر در روز است که با توجه به قرار داشتن در تیر ماه منطقی به نظر می‌رسد. همچنین ازآنجاکه تبخیر و تعرق واقعی سنجش شده است، مقادیر حداقل تبخیر و تعرق نیز صفر است؛ چراکه تبخیر و تعرق واقعی از دو حالت خارج نیست: وجود تبخیر و تعرق و نبود تبخیر و تعرق.

جدول ٤. مقادیر توزیع مکانی روزانه حداقل و حداکثر تبخیر و تعرق روزانه برای تصاویر بررسی‌شده برحسب میلی‌متر در منطقه موردمطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۲

تاریخ تصویر بررسی‌شده	حداقل تبخیر و تعرق روزانه	حداکثر تبخیر و تعرق روزانه
۲۰۱۷/۸/۲۲	۰/۰۰	۱۰/٤۲
۲۰۱۸/۸/۲۸	۰/۰۰	۱۰/۰٦
۲۰۱۹/٦/۱۱	۰/۰۰	۹/۱۲
۲۰۲۰/٦/۲	۰/۰۰	۸/۹۷
۲۰۲۱/٥/۲۹	۰/۰۰	۷/۸۹
۲۰۲۲/۷/۱۹	۰/۰۰	۱۱/۹۷



شکل ۲. نقشه حداکثر تبخیر و تعرق برآوردی در تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۲

۳. ۳. ارزیابی و مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق بر اساس روش‌های بررسی‌شده

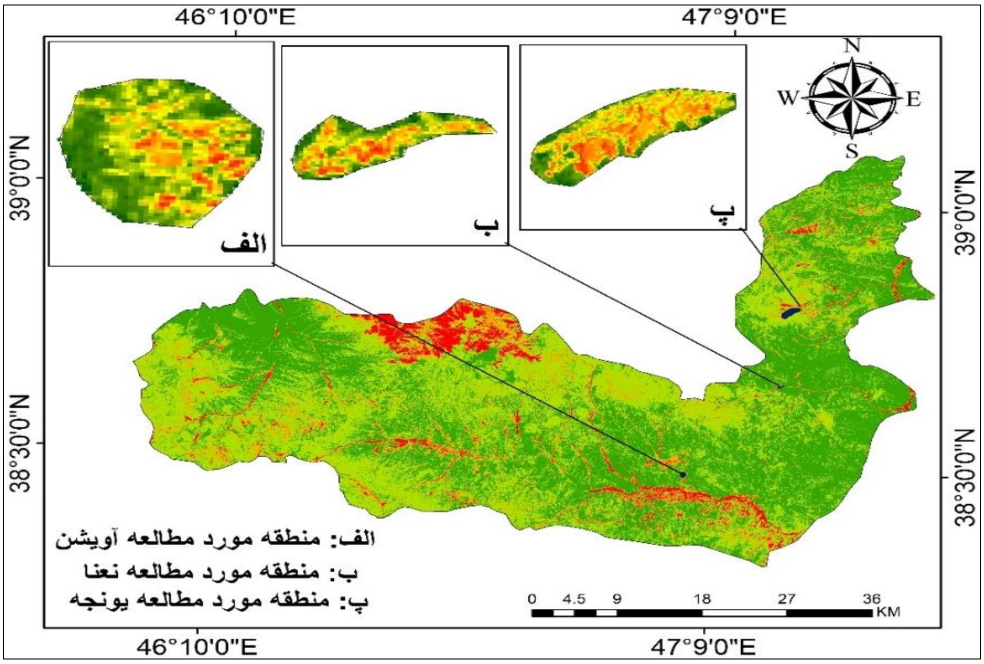
با محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق براساس روش‌های سبال و پنمن مانتیث و اعمال ضرایب گیاهی (جدول ٤) محصولات بررسی‌شده (آویشن، نعناع و یونجه)، می‌توان آن‌ها را با

یکدیگر مقایسه کرد (شکل ۳ نشان‌دهنده مراتع بررسی‌شده است). هر چند در پژوهش حاضر از داده‌های لایسیمتری به دلایل زیر استفاده نشد که عبارت‌اند از: ۱- نبود لایسیمتر یا غیرفعال بودن آن در منطقه موردمطالعه، ۲- هزینه زیاد کاشت لایسیمتر و زمان‌بر بودن آن برای استخراج نتایج موردنیاز (روهف و همکاران[1]، ۲۰۱۲، ص. ۷۰٤؛ کوندو و همکاران[2]، ۲۰۱۸، ص. ۲) و ۳- مغایرت با ماهیت سنجش از دوری پژوهش (هاوسلر و همکاران[3]، ۲۰۱۸، ص. ۳)؛ درحالی‌که در پژوهش حاضر سعی شده است که با استفاده از روش دور سنجی میزان تبخیر و تعرق برآورد شود. در جهان پژوهش‌های زیادی انجام یافته یا در حال انجام است که در آن‌ها از لایسیمتر استفاده نشده (اسدی و کامران، ۲۰۲۲؛ اسدی و کامران، ۲۰۲۳؛ روات و همکاران، ۲۰۱۹؛ النمر و همکاران، ۲۰۱۹ و غیره.) و برای صحت‌سنجی و مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده از روش سبال، از روش پنمن مانتیث استفاده شده است. براساس روش سبال، محصول نعنا در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۱/۵/۲۹ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۲/۸٤ میلی‌متر در روز و محصول یونجه نیز در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۱۹/٦/۱۱ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۳/٤۹ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره اولیه رشد محصول براساس روش پنمن مانتیث کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۹/٦/۱۱ با مقدار عددی ۳/۱۷ میلی‌متر در روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق نیز مربوط به محصول آویشن در تاریخ ۲۰۲۰/٦/۲ با مقدار عددی ٤/۰۲ میلی‌متر در روز است (جدول ۵).

همچنین در دوره پایانی رشد در روش سبال محصول نعنا در تاریخ ۲۰۱۸/۸/۲۸ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ٦/۱۸ میلی‌متر در روز و محصول آویشن نیز در دوره پایانی رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۷/٤۱ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره پایانی رشد محصول براساس روش پنمن مانتیث کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۷/۸/۲۲ با مقدار عددی ۵/٤۹ میلی‌متر در

1. Ruhoff
2. Kundu
3. Häusler

روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق نیز مربوط به محصـول آویشـن در تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۷/۳٤ میلی‌متر در روز است (جدول ٦).



شکل ۳. مزارع نمونه بررسی‌شده در منطقه موردمطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۲

جدول ۵. ضرایب گیاهی استفاده‌شده در پژوهش (برگرفته شده از سایت فائو[1])

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۲

نام محصول	مرحله اولیه	مرحله پایانی
آویشن	۰/۳۳	۰/۹۹
یونجه	۰/۳۰	۰/۹۰
نعنا	۰/٤۰	۰/۹۵

1. Http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.jpg

جدول ٦. مقادیر برآوردی نیاز آبی مراتع بررسی‌شده برحسب میلی‌متر در دوره اولیه رشد

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ١٤٠٢

مدل محصول	تاریخ تصویر در دوره اولیه رشد	سبال	پنمن مانتیث
آویشن	٢٠٢٠/٦/٢	٣/٣٢	٤/٠٢
یونجه	٢٠١٩/٦/١١	٣/٤٩	٣/١٧
نعنا	٢٠٢١/٥/٢٩	٢/٨٤	٣/٩١

جدول ٧. مقادیر برآوردی نیاز آبی مراتع بررسی‌شده برحسب میلی‌متر در دوره پایانی رشد

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ١٤٠٢

مدل محصول	تاریخ تصویر در دوره پایانی رشد	سبال	پنمن مانتیث
آویشن	٢٠٢٢/٧/١٩	٧/٤١	٧/٣٤
یونجه	٢٠١٧/٨/٢٢	٦/٣٧	٥/٤٩
نعنا	٢٠١٨/٨/٢٨	٦/١٨	٧/٠٩

٣. ٤. اعتبارسنجی مقادیر برآوردی تبخیر و تعرق

در این بخش، با استفاده از روش‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا[1] (RMSE) و میانگین انحراف مطلق[2] (MAD) روش‌های موردمطالعه از نظر کارایی با یکدیگر مقایسه شده و ضریب تعیین و خطاهای موجود مشخص شدند.

بر اساس جدول ٧ که نشان‌دهنده مقایسه‌های میان روش‌های موردمطالعه در دوره‌های اولیه و پایانی رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق است، کمترین میزان RMSE و MAD بر پایه روش سبال درمجموع در دوره‌های اولیه و پایانی رشد در مقایسه با روش پنمن مانتیث مربوط به محصول آویشن به‌ترتیب با مقدار عددی ٠/٤٩٧ و ٠/٣٨٥ است و بیشترین میزان RMSE و MAD بر پایه روش سبال در مقایسه با روش پمن مانتیث به‌ترتیب مربوط به محصول نعنا با مقدار عددی ٠/٩٩٣ و ٠/٩٩٠ است. در حالت کلی با میانگین‌گیری از ضرایب خطا، از جداول مطرح‌شده می‌توان نتیجه گرفت که

1. Root Mean Square Error
2. Mean Absolute Deviation

روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانتیث دارای میزان خطا با RMSE برابر با ۰/۷۱۷ و MAD برابر با ۰/۶۵۸ است (جدول ۷).

همچنین بعد از محاسبه مقادیر خطای محصولات موردمطالعه براساس روش‌های بررسی‌شده با یکدیگر، در ادامه سعی شد با استفاده از روش‌های آماری ضریب تعیین، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق و براساس جداول ۵ و ٦، مقادیر خطا و ضریب تعیین (جدول ۷) بین روش‌های موردمطالعه نیز بررسی شود؛ بر این اساس، ضریب تعیین به‌دست‌آمده بین روش سبال و روش پنمن مانتیث ۰/۸٤ میلی‌متر در روز بوده که قابل‌قبول است. نتایج این بخش از تحقیق با نتایج پژوهش سهیلی‌فر و همکاران (۱۳۹۲) که با استفاده از مدل سبال به محاسبه تبخیر و تعرق نیشکر در اراضی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان پرداخته بودند، تطابق دارد؛ چراکه میزان ضریب تعیین بین روش سبال و پنمن مانتیث در آن حدود ۰/۷۷ بوده که نسبتاً قابل‌قبول است.

جدول ۸. مقایسه‌های میان روش‌های موردمطالعه بر پایه روش سبال در میانگین دوره‌های اولیه و پایانی رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱٤۰۲

محصول	پنمن مانتیث		ضریب تعیین بین روش سبال و پنمن مانتیث
	MAD	**RMSE**	r^2
آویشن	۰/۳۸۵	۰/٤۹۷	-----
یونجه	۰/٦۰۰	۰/٦٦۲	
نعنا	۰/۹۹۰	۰/۹۹۳	
میانگین	۰/٦٥۸	۰/۷۱۷	۰/۸٤

نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های زیر همخوانی دارد: مخوانازی و همکاران[1] (۲۰۱۵) به برآورد نیاز آبی سه محصول لوبیا، گندم و ذرت با روش‌های سبال و سبال A پرداختند. براساس نتایج، میزان RMSE آن‌ها در مقایسه میان لوبیا و گندم با روش سبال A ۰/۸۲ و در

1. Mkhwanazi

مقایسه با روش سبال ۱/۹۷ بود. ما و همکاران[1] (۲۰۱۲) با استفاده از الگوریتم سبس و تصاویر ماهواره لندست ۵ میزان نیاز آبی محصولاتی همچون گندم و برنج را با RMSE برابر ۰/۷٤ نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده ارزیابی کردند.

٤. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با استفاده از روش سنجش از دوری سبال، مقادیر تبخیر و تعرق واقعی گیاهان مرتعی همچون آویشن، نعناع و یونجه در شهرستان اهر به دست آمد. نتایج پژوهش به دلیل نبود لایسیمتر در منطقه موردمطالعه با نتایج حاصل از روش پنمن مانتیث مقایسه شد. نتیج بیانگر آن بود که براساس روش سبال، محصول نعنا در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۱/۵/۲۹ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۲/۸٤ میلی‌متر در روز و محصول یونجه نیز در دوره اولیه رشد محصول به تاریخ ۲۰۱۹/٦/۱۱ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۳/٤۹ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره اولیه رشد محصول براساس روش پنمن مانتیث، کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۹/٦/۱۱ با مقدار عددی ۳/۱۷ میلی‌متر در روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق مربوط به محصول آویشن در تاریخ ۲۰۲۰/٦/۲ با مقدار عددی ٤/۰۲ میلی‌متر در روز است.

در دوره پایانی رشد در روش سبال محصول نعنا در تاریخ ۲۰۱۸/۸/۲۸ کمترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ٦/۱۸ میلی‌متر در روز و محصول آویشن نیز در دوره پایانی رشد محصول به تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ بیشترین میزان تبخیر و تعرق را با مقدار عددی ۷/٤۱ میلی‌متر در روز داشته است. همچنین در دوره پایانی رشد محصول براساس روش پنمن مانتیث، کمترین میزان تبخیر و تعرق در تاریخ ۲۰۱۷/۸/۲۲ با مقدار عددی ۵/٤۹ میلی‌متر در روز مربوط به محصول یونجه و بیشترین میزان تبخیر و تعرق نیز مربوط به محصول آویشن در تاریخ ۲۰۲۲/۷/۱۹ با مقدار عددی ۷/۳٤ میلی‌متر در روز است. همان‌گونه که مشاهده شد، میزان تبخیر و تعرق گیاهان بررسی‌شده در دوره آغازین رشد کمتر از دوره پایانی رشد است که می‌توان دلیل آن را در افزایش اندازه گیاهان که سطح برخورد بیشتری با نور آفتاب دانست

1. Ma

و همچنین افزایش ساعات آفتابی و درنتیجه تابش بیشتر خورشید در دوره پایانی رشد دانست. همچنین همان‌گونه که از نتایج پیداست، گیاه نعناع تبخیر کمتری به خود اختصاص داده است که می‌توان در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و آبیاری محصول و کشت انبوه و اقتصادی‌تر آن استفاده کرد.

براساس مقایسه‌های میان روش‌های موردمطالعه در دوره اولیه و پایانی رشد از نظر مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق، کمترین میزان RMSE و MAD بر پایه روش سبال، درمجموع در دوره اولیه و پایانی رشد در مقایسه با روش پنمن مانتیث مربوط به محصول آویشن به‌ترتیب با مقدار عددی ۰/٤۹۷ و ۰/۳۸۵ است و بیشترین میزان RMSE و MAD بر پایه روش سبال در مقایسه با روش پمن مانتیث به‌ترتیب مربوط به محصول نعنا با مقدار عددی ۰/۹۹۳ و ۰/۹۹۰ است. در حالت کلی با میانگین‌گیری از ضرایب خطا، از جداول مطرح‌شده می‌توان نتیجه گرفت که روش سبال در مقایسه با روش پنمن مانتیث دارای میزان خطا با RMSE برابر با ۰/۷۱۷ و MAD برابر با ۰/٦۵۸ است؛ بنابراین با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان با تکیه بر روش‌های سنجش از دوری مانند سبال و استفاده حداقلی از داده‌های زمینی، نیاز آبی مراتع مهم و ضروری را با دقت قابل‌قبولی برآورد کرد و ضمن اصلاح و مدیریت کشت و آبیاری مراتع، با سیاست‌گذاری درست و شناسایی مراتعی که نیاز آبی کمی دارند، حداکثر بهره‌برداری را از منابع آبی کرد تا بدین ترتیب در منطقه و کشور کم‌آبی چون ایران با تهدیدهای جدی‌تری از نظر منابع آبی مواجه نشد.

کتابنامه

۱. اسدی، م.، باعقیده، م.، ولیزاده کامران، خ.، و ادب، ح. (۱۳۹۹). ارزیابی همبستگی پوشش گیاهی با دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: استان اردبیل). *پژوهش‌های محیط‌زیست*، *۱۱*(۲۲)، ۹۸-۸۷.

۲. اسدی، م.، ولیزاده کامران، خ.، باعقیده، م.، و ادب، ح. (۱۳۹۹). برآورد میزان تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از الگوریتم سبال کوهستانی بر پایه گیاه نخود (مطالعه موردی: نیمه شمالی استان اردبیل). *هیدروژئومورفولوژی*، *۷*(۲۲)، ۸۵-٦۷.

۳. اسدی، م.، ولیزاده کامران، خ.، باعقیده، م.، و ادب، ح. (۱۳۹۹). مقایسه و تخمین سپیدایی سطوح مختلف کاربری اراضی با استفاده از روش سبال و متریک. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۰(۵۹)، ۱۵۷-۱۷۱.

٤. سهیلی‌فر، ز.، میرلطیفی، س. م.، ناصری، عب. ع.، و عصاری، م. (۱۳۹۲). برآورد تبخیر و تعرق واقعی نیشکر با استفاده از داده‌های سنجش از دور در اراضی کشت و صنعت نیشکر میرزا کوچک خان. *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۳(۱)، ١٦٣-۱۵۱.

٥. ولیزاده کامران، خ.، و اسدی، م. (١٤٠٢). برآورد سطح زیرکشت گندم با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (مطالعه موردی: نیمه شمالی استان اردبیل). *فضای جغرافیایی*، ۲۳(۸۱)، ۵۹-٤٥.

6. Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *133*(4), 380-394.
7. Allen, R., Waters, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastianssen, W. (2002). *SEBAL (surface energy balance algorithms for land)- Advanced training and user's manual*, version 1.0.
8. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (Eds.). (1998). FAO Irrigation and Drainage. No. Paper 56.
9. Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) model. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, *133*, 380–394.
10. Al Zayed, I. S., Elagib, N. A., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2016). Satellite-based evapotranspiration over Gezira Irrigation Scheme, Sudan: A comparative study. *Agricultural Water Management*, *177*, 66-76.

11. Asadi, M., & Karami, M. (2020). Estimation of evapotranspiration in Fars province using experimental indicators. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, *20*(56), 159-175.
12. Asadi, M., & Kamran, K. V. (2022). Comparison of SEBAL, METRIC, and ALARM algorithms for estimating actual evapotranspiration of wheat crop. *Theoretical and Applied Climatology*, *149*(1-2), 327-337.
13. Asadi, M., & Kamran, K. V. (2023). Estimating selected cultivated crop water requirement-based surface energy balance algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, *16*, 298.
14. Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, (212–213), 198–212.

15. Costa, J. D. O., Coelho, R. D., Wolff, W., José, J. V., Folegatti, M. V., & Ferraz, S. F. D. B. (2019). Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. *Scientia Agricola*, *76*(2), 93-101.
16. de Arellano, J. V.-G., Van Heerwaarden, C. C., Van Stratum, B. J. H., & Van Den Dries, K. (2015). *Atmospheric boundary layer: Integrating air chemistry and land interactions*. New York: Cambridge University Press.
17. Du, J., Song, K., Wang, Z., Zhang, B., & Liu, D. (2013). Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, *23*(1), 73-91.
18. Elnmer, A., Khadr, M., Kanae, S., & Tawfik, A. (2019). Mapping daily and seasonally evapotranspiration using remote sensing techniques over the Nile delta. *Agricultural Water Management, 213*, 682-692.
19. Genanu, M., Alamirew, T., Senay, G., & Gebremichael, M. (2017). Remote sensing based estimation of evapo-transpiration using selected algorithms: The case of Wonji Shoa Sugar Cane Estate, Ethiopia. *Preprints*, 2016080098.
20. Hu, Z., Yu, G., Zhou, Y., Sun, X., Li, Y., Shi, P., …, & Li, S., (2009). Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model. *Agricultural and Forest Meteorology*, *149*, 1410–1420.
21. Karami, M., & Asadi, M. (2016). Estimates and zoning of reference evapotranspiration by FAO-penman-monteith (Case study: North West of Iran). *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, *2*(1), 210-216.
22. Kosa, P. (2011). The effect of temperature on actual evapotranspiration based on Landsat 5 TM satellite imagery. In L. Labedzki (Ed.), *Evapotranspiration*. DOI: 10.5772/14012/
23. Kundu, S., Mondal, A., Khare, D., Hain, C., & Lakshmi, V. (2018). Projecting climate and land use change impacts on actual evapotranspiration for the Narmada River Basin in central India in the future. *Remote Sensing*, *10*(4), 578.
24. Lage, M., Bamouh, A., Karrou, M., & El Mourid, M. (2003). Estimation of rice evapotranspiration using a microlysimeter technique and comparison with FAO Penman-Monteith and Pan evaporation methods under Moroccan conditions. *Agronomie*, *23*, 625–631.
25. Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and google earth engine cloud computing. *Remote Sensing*, *178*, 81–96.
26. Liu, X., Xu, J., Wang, W., Lv, Y., & Li, Y. (2020). Modeling rice evapotranspiration under water-saving irrigation condition: Improved canopy-resistance-based. *Journal of Hydrology*, *590*, 125435

27. Ma, W., Hafeez, M., Rabbani, U., Ishikawa, H., & Ma, Y. (2012). Retrieved actual ET using SEBS model from Landsat-5 TM data for irrigation area of Australia. *Atmospheric Environment*, *59*, 408-414.
28. Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A. (2016). A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. *Journal of Asian Earth Sciences*, *124*, 269-283.
29. Mather, P., & Tso, B. (2016). *Classification methods for remotely sensed data*. Florida: CRC Press.
30. McShane, R. R., Driscoll, K. P., & Sando, R. (2017). *A review of surface energy balance models for estimating actual evapotranspiration with remote sensing at high spatiotemporal resolution over large extents*. Scientific Investigations Report, Series Number 2017-5087.
31. Mkhwanazi, M., Chávez, J. L., & Andales, A. A. (2015). SEBAL-A: A remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. Part I: Development and validation. *Remote Sensing*, *7*(11), 15046-15067.
32. Oberg, J. W., & Melesss, A. M. (2006). Evapotranspiration dynamics at an ecohydrological restoration site: an energy balance and remote sensing approach. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *42*(3), 565-582.
33. Omidvar, H., Song, J., Yang, J., Arwatz, G., Wang, Z.H., Hultmark, M., Kaloush, K., & Bou-Zeid, E. (2018). Rapid modification of urban land surface temperature during rainfall. *Water Resources Research*, *54*(7), 4245-4264.
34. Owaneh, O. M., & Suleiman, A. A. (2018). Comparison of the performance of ALARM and SEBAL in estimating the actual daily ET from Satellite data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *144*(9), 04018024.
35. Qiu, R., Liu, C., Cui, N., Wu, Y., Wang, Z., & Li, G. (2019). Evapotranspiration estimation using a modified Priestley-Taylor model in a rice-wheat rotation system. *Agricultural Water Management*, *224*, 105755.
36. Rawat, K. S., Singh, S. K., Bala, A., & Szabó, S. (2019). Estimation of crop evapotranspiration through spatial distributed crop coefficient in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, *213*, 922-933.
37. Ruhoff, A. L., Paz, A. R., Collischonn, W., Aragao, L. E. O. C., Rocha, H. R., & Malhi, Y. S. (2012). A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing Journal*, *4*, 703-725.
38. Silva, B. B. D., Mercante, E., Boas, M. A. V., Wrublack, S. C., & Oldoni, L. V., (2018). Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. *Revista Ciência Agronômica*, *49*(2), 221-227.
39. Singh, R. K., Irmak, A., Irmak, S., & Martin, D. L. (2008). Application of SEBAL model for mapping evapotranspiration and estimating surface energy

fluxes in south-central Nebraska. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*, *134*(3), 273-285.
40. Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, *6*(1), 85-100.
41. Valayamkunnath, P., Sridhar, V., Zhao, W., & Allen, R. G. (2018). Intercomparison of surface energy fluxes, soil moisture, and evapotranspiration from eddy covariance, largeaperture scintillometer, and modeling across three ecosystems in a semiarid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, *248,* 22–47.
42. Yang, Y., Zhou, X., Yang, Y., Bi, S., Yang, X., & Li Liu, D., (2018). Evaluating water-saving efficiency of plastic mulching in Northwest China using remote sensing and SEBAL. *Agricultural Water Management*, *209*, 240-248.
43. Zhou, X., Bi, S., Yang, Y., Tian, F., & Ren, D. (2014). Comparison of ET estimations by the three-temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. *Journal of Hydrology*, *519*, 769-776.
44. Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2010). *Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method)*. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida.